第41卷　第2期
2024年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41　No. 2
Feb. 2024

基于CWSI的汾河流域干旱时空变化特征

周　义，　索文姣

（山西师范大学地理科学学院，山西 太原　030000）

摘　要：基于MOD16数据，计算作物缺水指数(Crop Water Stress Index, CWSI)，结合汾河流域气象站点数据、植被指数数据和土地利用数据，采用差值法、线性趋势法和相关分析法，分析汾河流域2000—2021年干旱时空变化特征。结果表明：(1) CWSI能有效监测汾河流域旱情，其与10 cm土壤相对湿度呈显著负相关。(2) 汾河流域CWSI空间分布差异明显，呈现出南湿北旱的特点。(3) 汾河流域CWSI年际变化较为平稳，而月变化波动较大，5月CWSI达到年内峰值。(4) 汾河流域不同生长期内干旱情况差异显著，生长季前期(4—5月)特旱区占汾河流域总面积的48.55%；生长季中期(6—8月)基本全域无旱；生长季后期(9—10月)，仅11.17%的地区发生干旱。(5) 不同土地利用类型干旱程度不同，CWSI从小到大依次为：林地(0.686)<草地(0.749)<耕地(0.751)<未利用地(0.758)<城镇(0.765)。本研究结果可为汾河流域旱情监测和抗旱决策的制定提供科学数据支撑。

关键词：干旱；作物缺水指数(CWSI)；时空变化；汾河流域

中国是世界农业大国，农业在我国产业结构中占据非常重要的地位。农业生产强烈依赖气候和天气状况[1-2]，气象灾害影响并且制约着农业发展，其中，干旱灾害对农业的影响波及范围最广、影响强度最甚。干旱是一种常见的自然灾害，其特点是发生频率高、涉及范围广、持续时间长，对经济发展和生态环境有着重要影响[3]。因此，对干旱进行精准有效的监测，具有非常重要的意义。

当前，已发展出许多相对有效的干旱监测方法。传统干旱监测方法是基于站点数据计算干旱指数，从而监测干旱的发生发展[4-7]；但传统方法常因站点分布不均、数据有限，而无法进行大范围干旱监测[8]，且不能及时有效地反映区域干旱时空变化特征。相较于传统方法，遥感科学与技术的发展很好地弥补了这些不足。基于遥感数据的干旱监测指数主要有：植被状态指数(Vegetation Condition Index,VCI)、温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)、植被供水指数(Vegetation Supply Water Index, VSWI)、作物缺水指数(Crop Water Stress Index, CWSI)等。其中，基于蒸散发数据的CWSI因其适用范围广、精度高等特点而被广泛应用于干旱监测研究[9-11]。但因蒸散发数据难以获取和计算，且缺乏长时间序列的连续遥感数据，导致使用作物缺水指数法进行干旱监测有很大的局限性。值得指出的是，2011年美国NASA团队基于Penman-Monteith遥感模型研发出MOD16蒸散发数据集，该数据集通过了全球通量塔数据验证，模拟精度达86%[12-13]，它为计算CWSI提供了新的可能。国内学者也对MOD16产品进行了验证，将其用于监测区域蒸散发特征[14-18]与干旱变化情况[2,19]，并取得了较好的成果。CWSI是基于遥感方法计算得出的，其特点是精度高并可进行连续大面积监测。CWSI与其他干旱指数最大的不同点在于其考虑了蒸散发，而蒸散作用的强弱与土壤水分有着密切联系。当土壤水分亏缺时，蒸散作用较弱，因此，利用蒸散速率来间接监测土壤水分具备可行性。

山西省地处大陆性季风气候区，春季干旱频繁发生，基本每十年中有九年发生春旱，素有“十年九旱”之称[20]。干旱对山西省的影响已超过其他气象灾害总和的2倍以上，致使干旱成为山西省气象灾害之首。而汾河流域作为山西省农业种植的主要地区，占据山西省总面积的1/4，因而成为了山西省

收稿日期：2023-04-07；　**修订日期：**2023-10-25
基金项目：国家自然科学基金项目(41901339)资助
作者简介：周义(1985-)，男，博士，讲师，研究方向为资源环境遥感. E-mail: aboatnju@163.com
通讯作者：索文姣. E-mail: m17636260419@163.com

干旱易发区和旱情监测核心区。因此,分析汾河流域长时间序列干旱时空变化特征,可为该地区防旱、抗旱决策提供科学数据依据。

1 研究区概况

汾河流域地处黄河流域中游,位于110°30′~113°32′E、35°20′~39°00′N,地跨忻州、太原、晋中、吕梁、临汾以及运城6个地级市(图1),流域面积为39471 km^2,占山西全省面积的25.3%[21-22]。流域属于中纬度温带大陆性季风气候,年均气温8~14 °C,年均降水量400~550 mm,降水量年际变化大、年内分配不均,汛期(6—9月)降水量占全年的60%左右,易发生旱涝灾害[23]。流域年均实际蒸发量300~500 mm,年均潜在蒸发量1400~1600 mm[11,16]。汾河流域是山西省农业生产的主要基地,其农业产值占全省的64%,农作物以小麦、玉米为主,流域内耕地面积约占山西省总耕地面积的30%[24-25]。因此,对汾河流域进行精确的干旱监测,具有非常重要的意义。

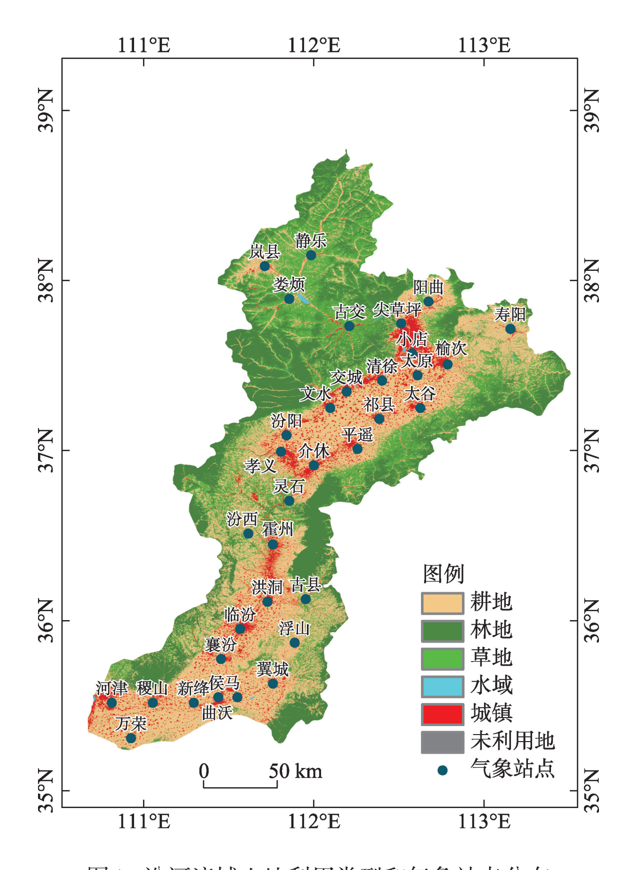


图1 汾河流域土地利用类型和气象站点分布

Fig. 1 Distribution of landuse types and meteorological stations in the Fenhe River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源

全球陆地蒸散发产品MOD16,时间分辨率有8 d合成及年合成,空间分辨率为1 km。本研究使用2000—2021年汾河流域8 d合成(MOD16A2)、年合成(MOD16A3)产品中包含的实际蒸散量(ET)和潜在蒸散量(PET)数据,轨道号为h26v05、h27v05,数据来源于NTSG(http://www.n-tsg.umt.edu/)。为便于分析,采用平均值法将8 d数据合成为月值数据,并借助MRT(Modis Reproj-ection Tool)工具对影像进行拼接、重投影、格式转换等预处理。

2001—2020年归一化植被指数NDVI数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/data),该数据集是在旬(每10 d)数据的基础上采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)生成的植被指数数据集。

2012年4—10月汾河流域气象站点土壤相对湿度源自国家气象信息中心(http://data.cma.cn/data/)提供的天津农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集。该数据集包括10 cm、20 cm、50 cm、70 cm和100 cm土壤相对湿度数据。

其他气象数据还包括2001—2020年降水量和气温数据,为便于分析,将月值数据处理为年值数据。数据来源见表1。

表1 数据名称及来源

Tab. 1 Data name and source

数据	时间	数据来源
MOD16A3 MOD16A2	2000—2021年	NTSG(http://www.ntsg.umt.edu/)
土壤相对湿度	2012年4—10月	国家气象信息中心(http://data.cma.cn/data/)
降水	2001—2020年	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)
温度	2001—2020年	
植被指数	2001—2020年	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)

2.2 研究方法

2.2.1 作物缺水指数法 作物缺水指数(Crop Water Stress Index, CWSI)由Jackson等[26-27]提出,该模型以能量平衡为基础监测植被覆盖条件下的土壤干旱程度。CWSI的计算公式如下:

$$CWSI = 1 - ET/PET$$

式中:ET为实际蒸散量(mm);PET为潜在蒸散量(mm)。CWSI值在0~1之间,值越大表示区域越干旱,值越小表示越湿润。

2.2.2　分析方法　采用差值法[3]来反映汾河流域2000—2021年CWSI的波动水平;采用线性趋势法[28]来反映汾河流域多年来CWSI的变化趋势;采用相关系数法[29]来分析汾河流域2001—2021年CWSI与影响因子的相关关系。

3　结果与分析

3.1　干旱监测结果检验

为确保CWSI监测干旱的有效性和准确性,首先需要对基于MOD16数据的CWSI进行检验。在本研究中利用土壤相对湿度对其进行检验。已有学者研究发现,在汾河流域利用MODIS数据进行土壤湿度估算的最佳深度为10 cm[30]。因此,对CWSI和10 cm土壤相对湿度的散点图进行分析(图2),发现当土壤相对湿度较低时,CWSI值较高,而土壤相对湿度较高时,CWSI值较低,两者呈显著负相关关系,相关系数通过了0.01的显著性检验。这说明基于MOD16数据的CWSI可以用于汾河流域干旱监测。此外,基于CWSI所表征的干旱程度,参照国家气象局旱情等级划分标准[31],对汾河流域干旱等级进行了划分(表2)。

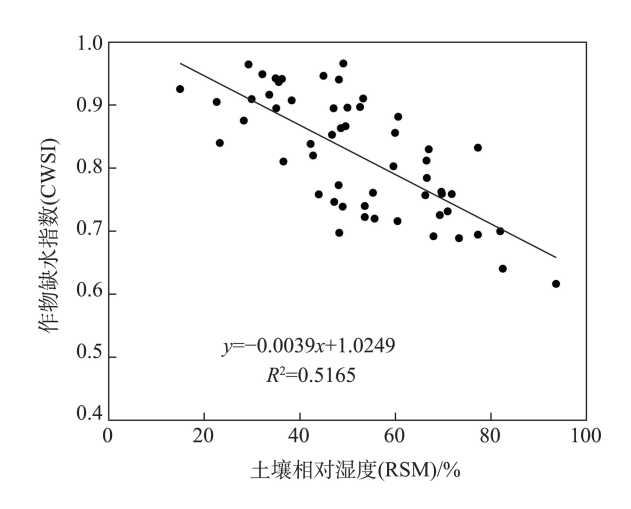


图2　作物缺水指数与10 cm土壤相对湿度散点图

Fig. 2　Crop water stress index and 10 cm soil relative moisture scatter plot

3.2　CWSI年际时空分布特征

汾河流域蒸散发及CWSI年际变化如图3所示,

表2　干旱等级划分标准

Tab. 2　Drought classification criteria

等级	类型	RSM/%	CWSI
1	无旱	>60	<0.7909
2	轻旱	50~60	0.7909~0.8296
3	中旱	40~50	0.8296~0.8689
4	重旱	30~40	0.8689~0.9079
5	特旱	<30	>0.9079

由图3可以看出:(1)蒸散量ET和潜在蒸散量PET年际波动不大,相对平稳;ET最大值为429.07 mm(2003年),最小值为278.83 mm(2011年),均值为343.15 mm;PET最大值为1765.40 mm(2013年),最小值为1408.33 mm(2003年),均值为1596.97 mm。(2)为对比分析CWSI年际变化,采用PET与ET的差值DET来反映波动水平,DET最大值为1476.03 mm(2013年),最小值为979.26 mm(2003年),均值为1253.81 mm,CWSI最大值为0.83(2013年),最小值为0.70(2003年),CWSI与DET变化趋势一致。(3)由CWSI年际变化可知,2000—2021年间汾河流域基本处于无旱或轻旱状态;2000—2021年间CWSI变化率处于0~10%之间,说明汾河流域旱情年变化较为平稳、波动不大。另外,从区域干旱面积年际变化来看(图4),汾河流域以轻旱为主,未出现特旱情况,且近些年来汾河流域干旱面积在逐渐减少,旱情逐渐缓解。

从汾河流域干旱空间分布(图5)来看,流域呈四周湿润、中间干旱,南部湿润、北部干旱的分布态

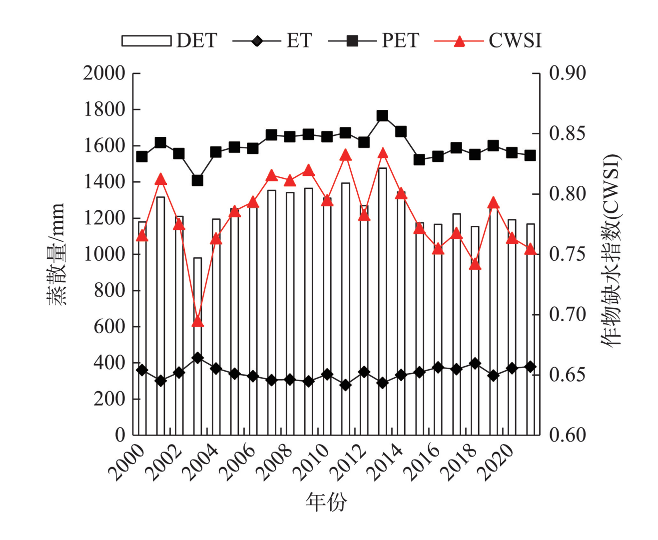


图3　汾河流域ET、PET、DET、CWSI年际变化

Fig. 3　Interannual variation of ET, PET, DET and CWSI in the Fenhe River Basin

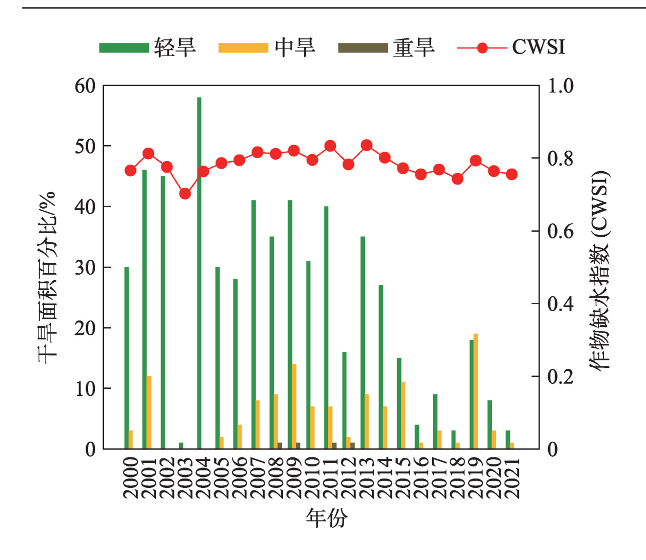


图4 汾河流域干旱类型面积占比年变化

Fig. 4 Annual variation of drought type area in the Fenhe River Basin

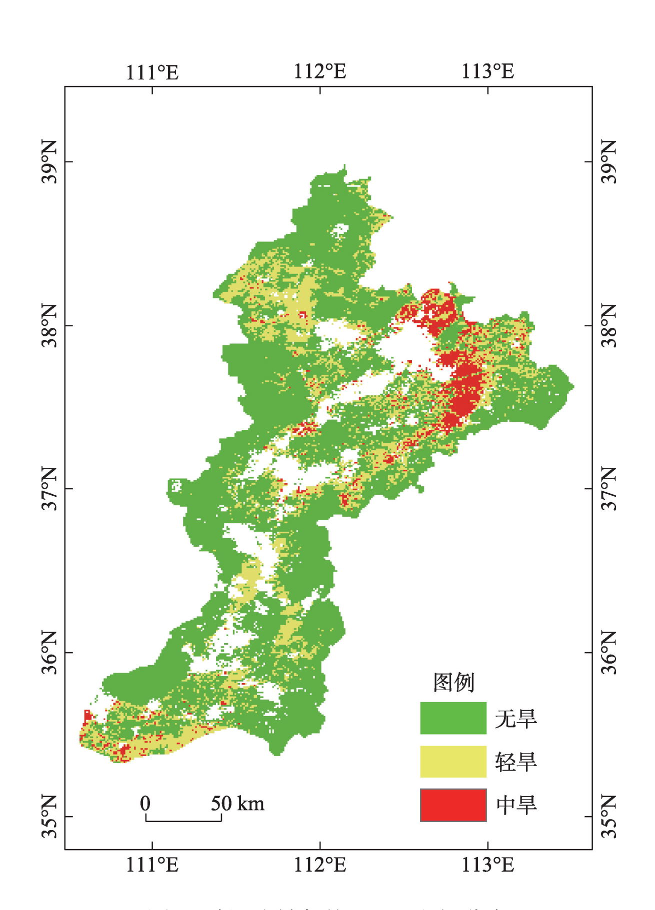


图5 汾河流域年均CWSI空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual CWSI in the Fenhe River Basin

势。且已有研究发现,汾河流域发生全域性干旱频率较小,但局部地区发生干旱的频率比较大[32]。北部太原-晋中一带旱情明显,达到轻旱、中旱级别;南部相对湿润,运城一带出现轻旱。其中,无旱区占流域面积的71.36%;轻旱区占流域面积的22.71%,主要分布在岚县、娄烦、阳曲、寿阳、祁县、平遥、万荣等地;中旱区占流域面积的5.93%,主要分布在晋中。逐像元计算CWSI变化趋势(图6)可以看出,流域CWSI整体呈上升趋势,*slope*>1的区域占比70%,其中,流域南部以及太原市周边地区CWSI上升趋势比较显著。此外,从年际CWSI、ET和PET与降水、气温以及NDVI的相关系数(表3)来看,ET与NDVI相关性最高,PET与降水的相关性最高,CWSI与降水、NDVI呈负相关、与温度呈正相关,即在降水较多、气温低、NDVI值高的地区,CWSI值较小,干旱发生强度低。

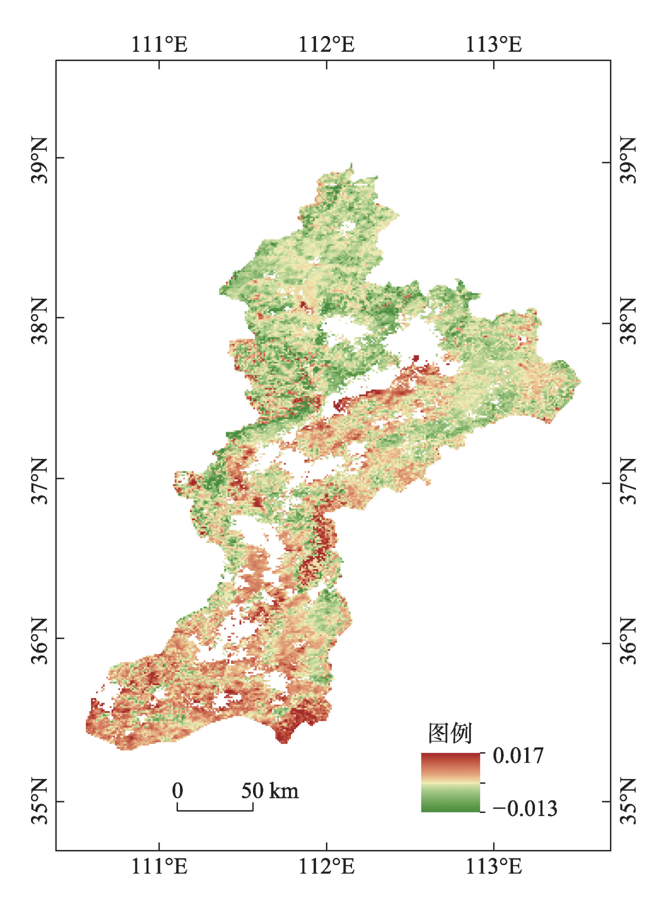


图6 汾河流域CWSI变化趋势

Fig. 6 Trends of CWSI in the Fenhe River Basin

表3 干旱年际变化下的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients of annual variation

	降水量	温度	NDVI
CWSI	−0.308**	0.214**	−0.422**
ET	0.233**	−0.161**	0.503**
PET	−0.351**	0.27**	0.03

注:**表示P<0.01。下同。

3.3 CWSI年内时空分布特征

汾河流域蒸散发及CWSI年内变化如图7所示,由图7可以看出:(1) ET和PET波动较大,均呈单峰曲线特征,ET最大值为60.61 mm(8月),最小值为14.73 mm(5月),PET最大值为219.07 mm(6月),最小值为54.27 mm(12月)。(2) DET最大值出现在5月,表明此月份流域干旱程度最大。(3) 流域CWSI呈双峰曲线特征,1—5月CWSI逐渐增大,表明干旱强度加剧,5月达到年内峰值,CWSI最大值为0.93,达到特旱强度;第二个峰值出现在10月,之后CWSI值呈下降趋势,12月达到年内最低。从干旱类型占比变化(图8)来看,流域旱情集中发生在3—6月,旱情强度以重旱和特旱为主,6月之后逐渐转变为以轻旱和中旱为主。

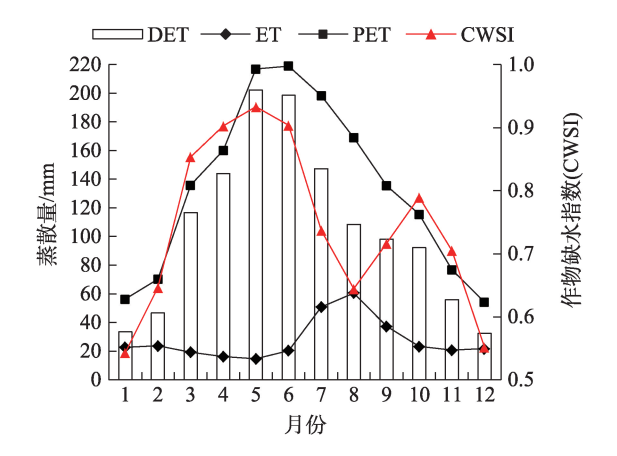


图7　汾河流域ET、PET、DET和CWSI年内变化

Fig. 7　ET, PET, DET and CWSI changes in the Fenhe River Basin during the year

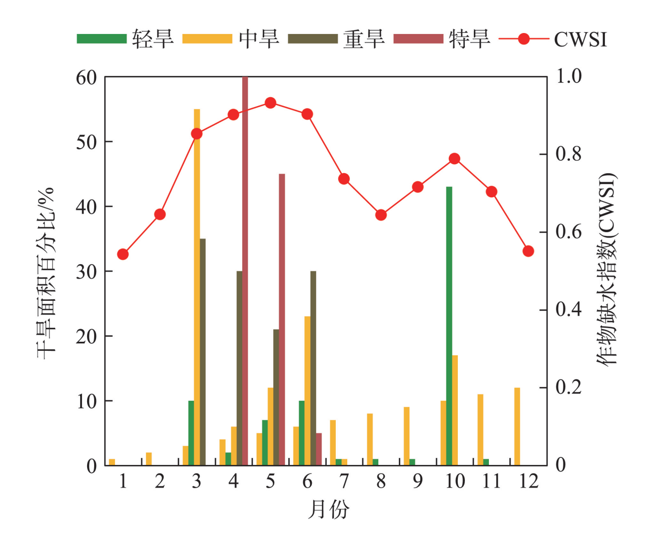


图8　汾河流域干旱类型面积占比月变化

Fig. 8　Monthly variation of drought types area in Fenhe River Basin

为揭示作物生长季不同时期的旱情发生情况,分别计算生长季前期(4—5月)、生长季中期(6—8月)、生长季后期(9—10月)的均值CWSI,其空间分布如图9所示。由表4可知,不同时期干旱强度差异显著:(1) 生长季前期CWSI值为0.5~0.95,旱情级别以重旱和特旱为主,无旱区仅占流域面积的6.3%,重旱区占流域面积的25.08%,主要分布在汾河流域东南部,特旱区占流域面积的48.55%,主要分布在汾河流域北部地区,包括忻州南部、太原、晋中等地。(2) 生长季中期CWSI值为0.25~0.86,流域93.87%的区域处于无旱状态,中旱区和轻旱区分别占全域面积的5.97%和0.16%。(3) 生长季后期CWSI值为0.37~0.85,相较于中期,后期旱情强度加剧,中旱区和轻旱区共占流域面积的11.17%。这可能与生长季后期降水量减少,农作物收割后植被减少、蒸腾作用减弱有关。此外,由年内CWSI、ET和PET与降水、气温以及NDVI的相关系数(表5)来看,CWSI与降水量和NDVI呈负相关、与温度呈正相关关系,虽相关系数不高,但蒸散量ET与降水、温度和NDVI的相关性均较强,潜在蒸散量PET与温度相关系数最高,这说明干旱成因较为复杂,仅考虑降水、温度、NDVI对干旱的影响是远远不够的。

3.4 不同土地利用类型的CWSI特征分析

CWSI与土壤水分息息相关,不同土地利用类型其土壤水分含量不同,故不同土地利用类型下CWSI特征不同。由图10可知,不同土地利用类型下CWSI年均值差异较小,基本集中在0.6~0.8之间;ET值由小到大为:耕地(382.972)<草地(383.706)<城镇(386.542)<未利用地(401.35)<林地(469.997);PET值由小到大为:林地(1545.778)<耕地(1553.587)<未利用地(1557.925)<城镇(1560.249)<草地(1561.273);CWSI值由小到大为:林地(0.686)<草地(0.749)<耕地(0.751)<未利用地(0.758)<城镇(0.765);CWSI与PET变化趋势基本相同,表明CWSI受潜在蒸散的影响更大。林地一般地处山区,海拔较高,降水充足,植被类型多样,涵养水分能力强,故林地蒸散值较高,而其潜在蒸散力较弱,CWSI值低,发生干旱的风险较低;草地植株矮小且密集,水分蒸发较快,其涵养水分的能力不如林地;汾河流域作物类型以夏玉米和冬小麦为主,在作物生长季后期因作物收割、地表裸露而

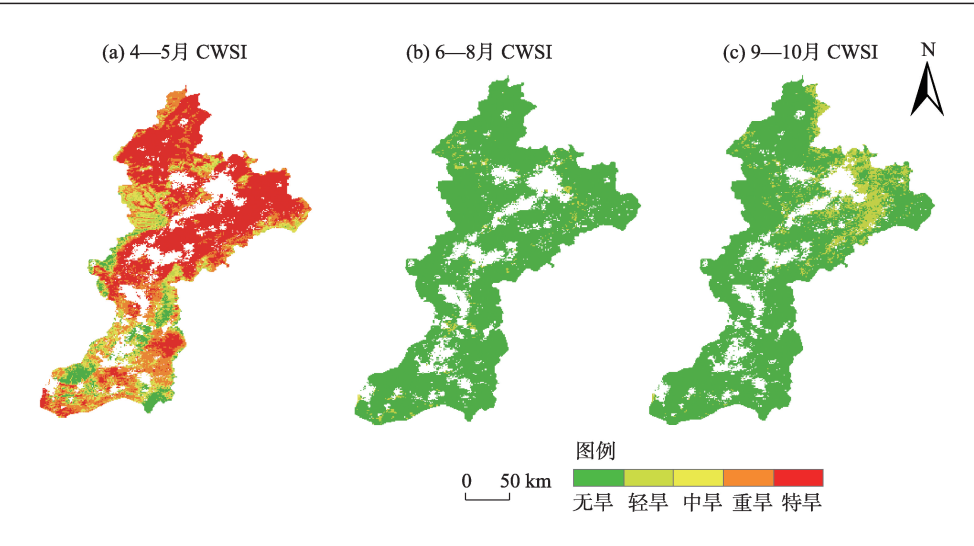


图9 汾河流域生长季CWSI空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of CWSI in growing season in the Fenhe River Basin

表4 生长季不同时期干旱类型面积占比

Tab. 4 Proportion of area of drought type at different times of growing season

	轻旱	中旱	重旱	特旱
4—5月	6.83%	13.29%	25.08%	48.55%
6—8月	5.97%	0.16%	0	0
9—10月	11.03%	0.14%	0	0

表5 干旱月变化下的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients of monthly variation

	降水量	温度	NDVI
CWSI	-0.439**	0.417**	-0.366**
ET	0.736**	0.516**	0.718**
PET	0.341**	0.803**	0.352**

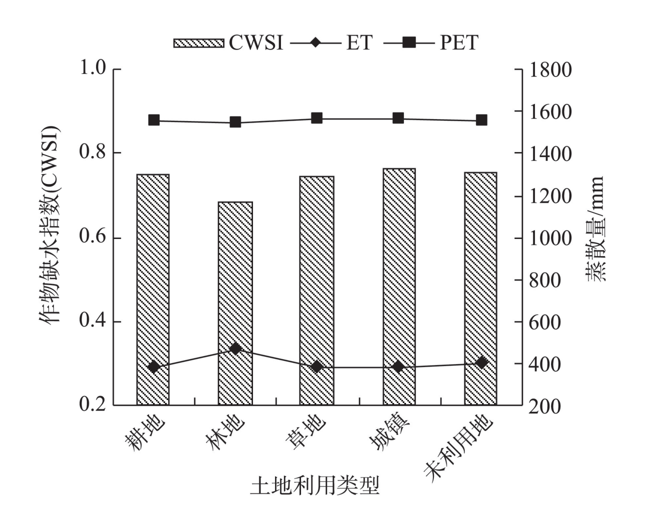


图10 不同土地利用类型下年均ET、PET、CWSI的变化

Fig. 10 Annual average changes of ET, PET and CWSI under different land use types

使得蒸散量变小，CWSI值增大；城镇则因为植被覆盖度低、温度高、路面硬化等原因，而使得水分流失速度加快，干旱发生的风险更高。

4 结 论

本研究基于MOD16数据计算汾河流域作物缺水指数CWSI，并结合气象站点观测资料、土地利用和植被指数数据，揭示汾河流域2000—2021年干旱时空分布特征。主要结论如下：

（1）汾河流域CWSI与10 cm土壤相对湿度呈显著负相关，说明CWSI能有效揭示汾河流域旱情，可用于汾河流域干旱监测。

（2）在空间上，汾河流域CWSI有较强的空间分异性，呈现出边缘山地地区湿润、中间盆地地区干旱，南部相对湿润、北部相对干旱的分布态势；其中，流域北部太原-晋中一带为干旱易发区，进而是该流域防旱、抗旱的关键区域。

（3）在时间上，汾河流域CWSI年际变化较为平稳，但CWSI年内月变化波动较大。尤其在作物生长季前期（4—5月），CWSI达到年内峰值，因此4月、5月是该流域防旱、抗旱的关键时段。

（4）在不同土地利用类型下，汾河流域CWSI从小到大依次为：林地<草地<耕地<未利用地<城镇，林地抗旱能力最强，城镇干旱发生风险最高。

参考文献（References）：

[1] 张强, 韩兰英, 张立阳, 等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害

风险特征与管理策略[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 80-91. [Zhang Qiang, Han Lanying, Zhang Liyang, et al. Analysis on the character and management strategy of drought disaster and risk under the climatic warming[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 80-91.]

[2] 吴孟泉, 崔伟宏, 李景刚. 温度植被干旱指数(TVDI)在复杂山区干旱监测的应用研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 30-35. [Wu Mengquan, Cui Weihong, Li Jinggang. Monitoring drought in mountainous area based on temperature/vegetation dryness index (TVDI)[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 30-35.]

[3] 汪左, 王芳, 张运. 基于CWSI的安徽省干旱时空特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 853-866. [Wang Zuo, Wang Fang, Zhang Yun. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing factors of drought in Anhui Province based on CWSI[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 853-866.]

[4] 张强, 鞠笑生, 李淑华. 三种干旱指标的比较和新指标的确定[J]. 气象科技, 1998(2): 49-53. [Zhang Qiang, Ju Xiaosheng, Li Shuhua. Comparison of three drought indicators and identification of new indicators[J]. Meteorological Science and Technology, 1998(2): 49-53.]

[5] 王劲松, 郭江勇, 倾继祖. 一种K干旱指数在西北地区春旱分析中的应用[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 709-717. [Wang Jinsong, Guo Jiangyong, Qing Jizu. Application of a kind of K drought index in the spring drought analysis in Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 709-717.]

[6] 邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 371-378. [Zou Xukai, Ren Guoyu, Zhang Qiang. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 371-378.]

[7] 陈家宁, 孙怀卫, 王建鹏, 等. 综合气象干旱指数改进及其适用性分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 71-77. [Chen Jianing, Sun Huaiwei, Wang Jianpeng, et al. Improvement of comprehensive meteorological drought index and its applicability analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 71-77.]

[8] 王晓燕, 李净, 邢立亭. 基于3种机器学习方法的农业干旱监测比较[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 322-332. [Wanng Xiaoyan, Li Jing, Xing Liting. Comparative agricultural drought monitoring based on three machine learning methods[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 322-332.]

[9] 刘安麟, 李星敏, 何延波, 等. 作物缺水指数法的简化及在干旱遥感监测中的应用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 210-214. [Liu Anlin, Li Xingmin, He Yanbo, et al. Simplification of crop shortage water index and its application in drought remote sensing monitoring[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 210-214.]

[10] 王玲玲, 张友静, 佘远见, 等. 遥感旱情监测方法的比较与分析[J]. 遥感信息, 2010, 25(5): 49-53. [Wang Lingling, Zhang Youjing, She Yuanjian, et al. Analysis and comparison of drought monitoring methods by remote sensing[J]. Remote Sensing of Information, 2010, 25(5): 49-53.]

[11] 田国珍, 武永利, 梁亚春, 等. 基于蒸散发的干旱监测及时效性分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 721-729. [Tian Guozhen, Wu Yongli, Liang Yachun, et al. Drought monitoring and timeliness based on evapotranspiration model[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 721-729.]

[12] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.

[13] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.

[14] 张静, 任志远. 基于MOD16的汉江流域地表蒸散发时空特征[J]. 地理科学, 2017, 37(2): 274-282. [Zhang Jing, Ren Zhiyuan. Spatiotemporal characteristics of evapotranspiration based on MOD16 in the Hanjiang River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(2): 274-282.]

[15] 吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于MOD16产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 617-627. [Wu Guiping, Liu Yuanbo, Zhao Xiaosong, et al. Spatio-temporal variations of evapot ranspiration in Poyang Lake Basin using MOD16 products[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 617-627.]

[16] 温媛媛, 赵军, 王炎强, 等. 基于MOD16的山西省地表蒸散发时空变化特征分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 255-264. [Wen Yuanyuan, Zhao Jun, Wang Yanqiang, et al. Spatiotemporal variation characteristics of surface evapotranspiration in Shanxi Province based on MOD16[J]. Progress in Geography, 2020, 39(2): 255-264.]

[17] 李晴, 杨鹏年, 彭亮, 等. 基于MOD16数据的焉耆盆地蒸散量变化研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 351-358. [Li Qing, Yang Pengnian, Peng Liang, et al. Study of the variation trend of evapotranspiration in the Yanqi Basin based on MOD16 data[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 351-358.]

[18] 康利刚, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖沙柳河流域蒸散发时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 358-372. [Kang Ligang, Cao Shengkui, Cao Guangchao, et al. Temporal and spatial changes of evapotranspiration in the Shaliu River Basin of Qinghai Lake[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 358-372.]

[19] 何慧娟, 卓静, 李红梅, 等. 基于MOD16产品的陕西关中地区干旱时空分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 236-241. [He Huijuan, Zhuo Jing, Li Hongmei, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of drought in Guanzhong region of Shaanxi Province based on MOD16 products[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 236-241.]

[20] 刘秀红, 李智才, 刘秀春, 等. 山西春季干旱的特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 156-160. [Liu Xiuhong, Li

Zhicai, Liu Xiuchun, et al. Features and causes of spring drought in Shanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(9): 156-160.]

[21] 李京京, 吕哲敏, 石小平, 等. 基于地形梯度的汾河流域土地利用时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 230-236. [Li Jingjing, Lv Zhemin, Shi Xiaoping, et al. Spatiotemporal variations analysis for land use in Fen River Basin based on terrain gradient [J] . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 230-236.]

[22] 张亚琳, 赵海燕, 王春玲, 等. 1979—2014年汾河流域干旱时空特征[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3): 145-151. [Zhang Yalin, Zhao Haiyan, Wang Chunling, et al. Temporal and spatial characteristics of drought from 1979 to 2014 in Fen River Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(3): 145-151.]

[23] 苏迎庆, 张恩月, 刘源, 等. 汾河流域土地利用变化及生态环境效应[J].干旱区研究, 2022, 39(3): 968-977. [Su Yingqing, Zhang Enyue, Liu Yuan, et al. Land-use changes and ecological environment effects on Fen River Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39 (3): 968-977.]

[24] 史利江, 刘敏, 李艳萍, 等. 汾河流域县域经济差异的时空格局演变及驱动因素[J]. 地理研究, 2020, 39(10): 2361-2378. [Shi Lijiang, Liu Min, Li Yanping, et al. The spatio-temporal evolution and influencing factors of economic difference at county level in Fenhe River Basin[J]. Geographical Research, 2020, 39(10): 2361-2378.]

[25] 伍博炜, 杨胜天, 邵南方, 等. 黄土高原生态脆弱区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以汾河流域为例[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 340-345. [Wu Bowei, Yang Shengtian, Shao Nanfang, et al. Effects of land use change on ecosystem service value in fragile ecological area of the Loess Plateau: A case study of Fenhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 340-345.]

[26] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133-1138.

[27] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A reexamination of the crop water stress index[J]. Irrigation Science, 1988, 9(4): 309-317.

[28] Tong S, Zhang J, Bao Y. Interdecadal spatiotemporal variations of aridity based on temperature and precipitation in Inner Mongolia, China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2017, 26(2): 819-826.

[29] Pearson K. Note on regression and inheritance in the case of two parents[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1895, 58: 240-242.

[30] 张洁, 武建军, 周磊, 等. 基于MODIS数据的农业干旱监测方法对比分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 48-54. [Zhang Jie, Wu Jianjun, Zhou Lei, et al. Comparative study on remotely sensed methods of monitoring agricultural drought based on MODIS data[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(5): 48-54.]

[31] 张强, 邹旭凯, 肖风劲, 等. GB/T 20481 - 2006. 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Zhang Qiang, Zou Xukai, Xiao Fengjin, et al. GB/T 20481-2006. The Grade of Meteorological Drought[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.]

[32] 马梓策. 华北地区干旱时空变化特征及其影响因素分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020. [Ma Zice. Spatial and Temporal Characteristics of Drought and Its Influencing Factors in North China[D]. Hohhot: Inner Mongol Normal University, 2020.]

Spatialtemporal variation characteristics of drought in the Fenhe River Basin based on CWSI

ZHOU Yi,　SUO Wenjiao
(College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, Shanxi, China)

Abstract: Based on MOD16 global evapotranspiration data, the Crop Water Stress Index (CWSI) was computed. This was combined with the meteorological station precipitation, temperature, and vegetation index data in the Fenhe River Basin, along with land use data. Employing the difference method, linear trend method, and correlation analysis, the temporal and spatial characteristics of drought in the Fenhe River Basin from 2000 to 2021 were analyzed. The results showed that: (1) CWSI effectively monitored drought in the Fenhe River Basin, displaying a notably negative correlation between CWSI and 10 cm soil relative moisture. (2) The spatial distribution of CWSI in the Fenhe River Basin exhibited significant disparities, illustrating wet conditions in the south and dry conditions in the north. (3) While interannual CWSI variations in the Fenhe River Basin remained relatively stable, monthly fluctuations were substantial, peaking in May annually. (4) Drought conditions varied distinctly during different growing periods in the Fenhe River Basin: significant drought occurred in the early growing season (April to May), encompassing 48.55% of the Fenhe River Basin area. No drought occurred in the mid-growing season (June to August). By the end of the growing season (September to October), only 11.17% of the area experienced drought. (5) Drought occurrences differed among various land use types, ranked by CWSI from smallest to largest: forest land (0.686) < grassland (0.749) < cultivated land (0.751) < unused land (0.758) < urban land (0.765). These study outcomes offer critical scientific data support for drought monitoring and decision-making regarding drought resistance in the Fenhe River Basin.

Keywords: drought; Crop Water Stress Index; spatiotemporal changes; Fenhe River Basin